

УДК 539.3

**ВЛИЯНИЕ ЦАРАПИН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЖЕСТКОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБРАЗЦОВ***С.Н. Якупов, Н.М. Якупов***Аннотация**

Развит экспериментально-теоретический подход для анализа жесткостных свойств тонкостенных образцов с царапинами. По экспериментальным данным вычислены приведенные тангенциальные жесткости на растяжение - сжатие и приведенные жесткости на изгиб и предложены модели изменения жесткостных свойств тонкостенных элементов с царапинами. Установлено, что поверхностные царапины приводят к существенному снижению тангенциальной и изгибной жесткости тонкостенных элементов конструкций. **Ключевые слова:** тонкостенные образцы, царапины, жесткость на растяжение-сжатие, жесткость на изгиб, экспериментально-теоретический метод

Наличие локальных дефектов в элементах конструкций является предвестником разрушения. Влияние поверхностных дефектов на концентрацию напряжений тонкостенных элементов мало изучено. При определении жесткостных свойств (тангенциальная жесткость  $B = Eh / (1 - \nu^2)$  и изгибная жесткость  $D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ ) стандартным одноосным испытанием полос, вырезанных из тонкостенных элементов с различными дефектами и повреждениями, наблюдается большой разброс результатов. Метод "индентора" [1] позволяет оценить твердость материала только в окрестности рассматриваемой точки и не позволяет оценивать жесткостные свойства тонкостенных элементов в целом. Возникают трудности и при численном моделировании тонкостенных элементов с различными дефектами. Оценка концентрации напряжений в области локальных углублений трехмерными конечными элементами в тонкостенных цилиндрических оболочках рассмотрена в статье [2], а в сферических оболочках - [3]. В данной работе на базе двумерного экспериментально - теоретического метода исследования предложены модели изменения жесткостных свойств тонкостенных элементов с царапинами в зависимости от их плотности и глубины. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Методика исследования. Для анализа жесткостных свойств тонкостенных образцов с царапинами развит экспериментально-теоретический подход [4-6]. Круглые тонкостенные образцы с царапинами крепятся на установке по контуру и нагружаются давлением воздуха  $p$ . В процессе увеличения давления  $p$  производится мониторинг формы купола, в частности, измеряется высота подъема вершины купола  $H$ . Используя соотношения нелинейной теории оболочек, определяются тангенциальная  $B$  и изгибная  $D$  жесткости тонкостенных элементов с царапинами. Для упругой мембраны в случае среднего изгиба, когда прогиб не превышает 2 - 3 толщин образца, геометрические соотношения берутся согласно [7] и для этого случая в [8] приведена зависимость между прогибом в центре мембраны  $H$  и давлением  $p$ , используя которую можно вычислить приведенную тангенциальную жесткость на растяжение - сжатие  $B$  и приведенную жесткость на изгиб  $D$ .

Результаты исследований. С целью изучения влияния поверхностных царапин на изменение жесткостных свойств тонкостенных элементов были рассмотрены образцы из стали Ст.3 радиусом  $R = 50$  мм с радиусом рабочей части  $a = 40$  мм и толщиной  $h = 0,6$  мм. На поверхность образцов были нанесены царапины (бороздки) с шагом  $b = 2,5$  мм; 5 мм; 10 мм и 20 мм или относительно к характерному размеру шагом царапин  $b_{ot} = b / 2a$ : 0,03125; 0,0625; 0,125; 0,25. В зависимости от глубины царапин  $t$  (относительной глубины  $tot = t / h$ ) рассмотрены три группы образцов: первая группа - глубина царапин  $t = 0,05$  мм ( $tot = 0,0833$ ); вторая группа -  $t = 0,1$  мм ( $tot = 0,1667$ ); третья группа -  $t = 0,2$  мм ( $tot = 0,3333$ ). До значения давлений менее  $p = 0,8$  МПа наблюдается упругая деформация, поэтому для анализа использованы формулы (2) рассмотрены экспериментальные данные при  $p = 0,04$  МПа. В таблице 1 приведены прогибы образцов в зависимости от относительного шага царапин  $b_{ot}$  и относительной глубины  $tot$  борозд. По экспериментальным данным вычислена: приведенная тангенциальная жесткость на растяжение - сжатие  $B$  (таблица 2) и приведенная жесткость на изгиб  $D$  (таблица 3) по формулам (2) для рассмотренных групп образцов.

Таблица 1.

	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)
$t_{ot}$ (t мм)	0,03125/(2,5 мм)	0,0625/(5 мм)	0,125/(10 мм)	0,25/(20 мм)
Без борозд	0,59	0,59	0,59	0,59
0,0833 (0,05)	0,78	0,70	0,65	0,60
0,1667 (0,10)	1,11	0,79	0,78	0,61
0,3333 (0,20)	1,55	1,00	0,92	0,63

Таблица 2.

	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)
$t_{ot}$ (t мм)	0,03125/(2,5 мм)	0,0625/(5 мм)	0,125/(10 мм)	0,25/(20 мм)
0,0833 (0,05)	63871,48	88368,51	110370,13	140326,06
0,1667 (0,10)	22162,70	61476,65	63871,48	133537,17
0,3333 (0,20)	8139,48	30310,40	38925,96	121218,80
Без борозд	147582,76	147582,76	147582,76	147582,76

Таблица 3.

	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)	$b_{ot}$ (b мм)
$t_{ot}$ (t мм)	0,03125/(2,5 мм)	0,0625/(5 мм)	0,125/(10 мм)	0,25/(20 мм)
0,0833 (0,05)	229,94	318,13	397,33	505,17
0,1667 (0,10)	79,79	221,32	229,94	480,73
0,3333 (0,20)	29,30	109,12	140,13	436,38
Без борозд	531,30	531,30	531,30	531,30

Как видно из таблицы 1, прогибы образцов с уменьшением шага царапин (борозд) увеличиваются для всех трех рассмотренных групп образцов. При этом с увеличением глубины царапин, прогибы увеличиваются. Причем, начиная с относительной глубины борозд  $t_{ot} = 0,1667$  и более, при относительном шаге  $b_{ot} = 0,0625$  и менее наблюдается резкое увеличение прогибов образцов. Как видно из таблиц 2 и 3 приведенные тангенциальные жесткости образцов  $B$  и приведенные

жесткости образцов на изгиб D с увеличением плотности царапин уменьшаются для всех трех рассмотренных групп образцов, при этом с ростом глубины царапин при увеличении их плотности наблюдается существенное снижение жесткости. На базе данных таблиц 2 и 3, а также используя способ наименьших квадратов [9], построены модели изменения приведенной тангенциальной жесткости образцов B и приведенной жесткости на изгиб D для тонкостенных элементов с царапинами в зависимости от их плотности  $b_{ot}$  и глубины  $t_{ot}$ :

$$B = 10^4(k_{00}^b t_{ot}^0 b_{ot}^0 + k_{01}^b t_{ot}^0 b_{ot}^1 + k_{02}^b t_{ot}^0 b_{ot}^2 + k_{10}^b t_{ot}^1 b_{ot}^0 + k_{11}^b t_{ot}^1 b_{ot}^1 + k_{12}^b t_{ot}^1 b_{ot}^2 + k_{20}^b t_{ot}^2 b_{ot}^0 + k_{21}^b t_{ot}^2 b_{ot}^1 + k_{22}^b t_{ot}^2 b_{ot}^2) \quad (1)$$

$$D = 10^3(k_{00}^d t_{ot}^0 b_{ot}^0 + k_{01}^d t_{ot}^0 b_{ot}^1 + k_{02}^d t_{ot}^0 b_{ot}^2 + k_{10}^d t_{ot}^1 b_{ot}^0 + k_{11}^d t_{ot}^1 b_{ot}^1 + k_{12}^d t_{ot}^1 b_{ot}^2 + k_{20}^d t_{ot}^2 b_{ot}^0 + k_{21}^d t_{ot}^2 b_{ot}^1 + k_{22}^d t_{ot}^2 b_{ot}^2) \quad (2)$$

Коэффициенты  $k_{ij}^b$  и  $k_{ij}^d$  входящие в соотношения (3) и (4), приведены в таблицах 4 и 5, соответственно; индексы i,j= 0,1,2.

Таблица 4.

$k_{00}^b$	$k_{01}^b$	$k_{02}^b$	$k_{10}^b$	$k_{11}^b$	$k_{12}^b$	$k_{20}^b$	$k_{21}^b$	$k_{22}^b$
8.7499	107.435	-331.54	-58.504	-522.88	2846.22	104.71	700.35	-4340.55

Таблица 5.

$k_{00}^d$	$k_{01}^d$	$k_{02}^d$	$k_{10}^d$	$k_{11}^d$	$k_{12}^d$	$k_{20}^d$	$k_{21}^d$	$k_{22}^d$
0.3130	3.8996	-12.0169	-2.0870	-19.094	103.246	3.7267	25.819	-158.016

Закключение: 1. На базе развитого экспериментально - теоретического метода построены модели изменения тангенциальной жесткости и изгибной жесткости тонкостенных элементов конструкций в зависимости от относительной плотности  $b_{ot}$  и относительной глубины царапин  $t_{ot}$ . 2. Установлено, что поверхностные царапины, являясь концентраторами напряжений, приводят к снижению тангенциальной и изгибной жесткости тонкостенных элементов конструкций. 3. Начиная с относительной глубины борозд более  $t_{ot} = 0,167$  и относительной плотности менее  $b_{ot} = 0,063$ , наблюдается существенное снижение как тангенциальной, так и изгибной жесткости образцов.

### Summary

*S.N. Yakupov, N.M. Yakupov.* INFLUENCE OF SCRATCHES ON CHARACTERISTICS OF THE RIGIDITY OF THIN-WALLED EXEMPLARS. Experimental and theoretical approach for the analysis the rigidity of properties of thin-walled exemplars with scratches is developed. According to the experimental data the given tangential rigidities on stretching - compression and the given rigidities on a bend are calculated and change models the rigidity of properties of thin-walled elements with scratches are offered. It is established that the surface scratches lead to essential decrease in a tangential and flexural rigidity of thin-walled elements of designs.

**Key words:** thin-walled exemplars, scratches, rigidity on stretching compression, a rigidity on a bend, an experimental and theoretical method.

**Литература**

1. *Oliver W., Pharr G. J.* Mater. Res. Soc. Symp. Proc. // – 1997. – No 1. – P. 473,57.
2. *Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р.* Газовая промышленность.// – 2013. – No 7. – С. 28-30.
3. *Якупов С.Н., Киямов И.Х.* Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.// – 2014. – No 2. – С. 76-80.
4. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Способ определения прочностных свойств тонкослойных материалов. Пат. РФ №2310184.
5. *Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Зав. лаб. Диагностика материалов.// – 2008. – No 11. – С. 54-56.
6. *Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н.* МТТ.// – 2011. – No 3. – С. 58-66.
7. *Муштары Х.М., Галимов К.З.* Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат.// – 1957. – С. 431.
8. *Галимов Н.К., Нуруллин Р.Г., Леонтьев А.А.* Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН. Казань: Изд-во КГУ// – 2004. – С. 129-139.
9. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. М.,// – 1962.

---

**Якупов Самат Нухович** – к.т.н., с.н.с., ИММ КазНЦ РАН

**Якупов Нух Махмудович** – д.т.н., зав.лаб., ИММ КазНЦ РАН

E-mail: *tamas\_86@mail.ru; yzsrr@kfti.knc.ru*